

## Aliağa (İzmir) Jeotermal Alanındaki Hidrotermal Alterasyonlar ve Termal Sularla İlişkisi

### *Hydrothermal Alterations and Relationship With Thermal Waters at Aliağa (İzmir) Geothermal Field*

\***Reyhan ÖZKAN<sup>1</sup>, Mehmet ŞENER<sup>2</sup>, Cahit HELVACI<sup>3</sup>, Mehmet Furkan ŞENER<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>MTA Genel Müdürlüğü, İzmir Bölge Müdürlüğü, İzmir

<sup>2</sup>Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Niğde

<sup>3</sup>9 Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir

Geliş (received) : 26 Ağustos (August) 2010

Kabul (accepted) : 05 Mart (March) 2011

#### ÖZ

Aliağa ve çevresinde yer alan kayalarda gözlenen hidrotermal alterasyonların özelliklerinin belirlenmesi ve termal sularla olan ilişkilerini saptamaya yönelik yapılan bu çalışmada, alınan kayaç örneklerinin alterasyon mineralleri ve jeokimyasal özellikleri ile su örneklerinin hidrojeokimyasal özellikleri birlikte ele alınarak, jeotermal sistemin oluşum sıcaklığı saptanmaya çalışılmıştır. Batı Anadolu'da Çandarlı Körfezi'nin güneyinde Aliağa ve yakın çevresini içine alan inceleme alanı, volkanik ve çökel kayalardan oluşan bir topluluk sunmaktadır. Miyosen yaşlı volkanik kayalar; andezit, latit andezit, bazaltik andezit, riyolit lavları ve bunlarla ilişkili piroklastiklerden oluşur. Miyosen yaşlı çökel kayalar ise, karasal ve görsel çökellerden meydana gelir. Bölgede, jeotermal akışkan akımını kontrol eden KD-KB doğrultulu aktif fay sistemleri bulunmaktadır. Alterasyon zonlarındaki kayaçlarda genel olarak bir silisleşme gözlenmektedir. Silisleşmenin yanı sıra killeşme, kloritleşme gibi alterasyon izleri de saptanmıştır. Jeotermal alandaki kaynak ve sondajlara ait suların kimyasal karakteri, bunları besleyen kaynağın meteorik ve deniz suyu kökenli olduğunu göstermektedir. Hidrotermal alterasyonu oluşturan bikarbonatlı ve klorürlü olmak üzere iki tip jeotermal akışkan bulunmaktadır. İnceleme alanından derlenen kayaç örneklerinde saptanan alterasyon ürünü minerallerden yararlanılarak hidrotermal alterasyon türleri, su örneklerine uygulanan bazı jeotermometre teknikleri ile de hazne kaya sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır. Kayaç analizlerinden elde edilen bulgulara göre, yöredeki alterasyon türleri ile arjilik, arjilik ve dış-pirofillitik alterasyon olmak üzere üçe ayrılarak incelenmiştir. Bu alterasyon türlerinde gözlenen karakteristik minerallerin ortaya çıkış veya kayboluş sıcaklıklarından, daha önceleri sistemde 175°C'ye kadar ulaşan bir akışkanın bulunduğu, aktif jeotermal sistemin şu andaki hazne kaya sıcaklığının ise yaklaşık 100-130°C arasında değişebileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Aliağa, hidrotermal alterasyon, jeotermal sistem, jeotermometre

#### ABSTRACT

*In this study, the alteration zones and geothermal geology of Aliağa area and surroundings have been investigated. The alteration zones and reservoir temperature have been determined via the use of the alteration minerals and geochemical properties of waters issuing in the area. The study area, which is lying between Çandarlı Bay and Menemen in western Anatolia has a rock association consisting of volcanic and sedimentary rocks. Miocene*

aged volcanic rocks are composed of andesitic, latitic andesitic, basaltic andesitic, rhyolitic lavas and associated pyroclastics. Miocene aged sedimentary rocks are terrestrial and lacustrine type. There are several fault systems trending NE-NW, which control the movement of geothermal fluids in the region. As a result of microscopical investigations of the rock samples collected from the alteration zones, silicification is observed in most of the rocks. Additionally, chloritisation and clay minerals are also seen. The chemical character of hot spring and well water in the geothermal area indicate that the source waters feeding these springs and wells are meteoric and sea water in origin. There are two types of geothermal fluids causing the hydrothermal alteration in the area. These are bicarbonate and chloride type waters. Hydrothermal alteration types have been determined by using the alteration minerals recognized in the rock samples of study area. The reservoir temperature of the present day geothermal system has been determined by applying chemical geothermometer techniques to water samples. According to the data obtained from rock analyses, the alteration types in the region are advanced argillic, argillic and outer-sub propylitic alteration. The characteristic alteration mineral assemblages indicate a fluid temperature reaching up to 175 oC in the paleogeothermal system of the area. However, it is estimated that the reservoir rock temperatures of the active geothermal system may be around 100-130 oC.

**Keywords:** *Aliağa, hydrothermal alteration, geothermal system, geothermometer*

## GİRİŞ

Aliağa jeotermal alanı, İzmir ili Aliağa ilçesi ve yakın çevresinde bulunan volkanik ve volkanosedimenter kayalardan oluşan bir alanı kapsar (Şekil 1).

Aliağa ve yakın yöresinin jeolojisi ve jeotermal sistemin özellikleri Kaya (1978, 1979), Şengüler vd. (2000), Akay ve Erdoğan (2004), Özkan (2004) ve Helvacı vd. (2009), tarafından çalışılmıştır. Birisi derin olmak üzere, toplam dört jeotermal akışkan arama kuyusunun açıldığı çalışma alanı, genç volkanik kayalar ve Neojen çökel topluluklarının bir arada bulunduğu Batı Anadolu'nun tektonikçe aktif alanlarından biri olup, KB ve KD gidişli faylarla şekillenmiştir.

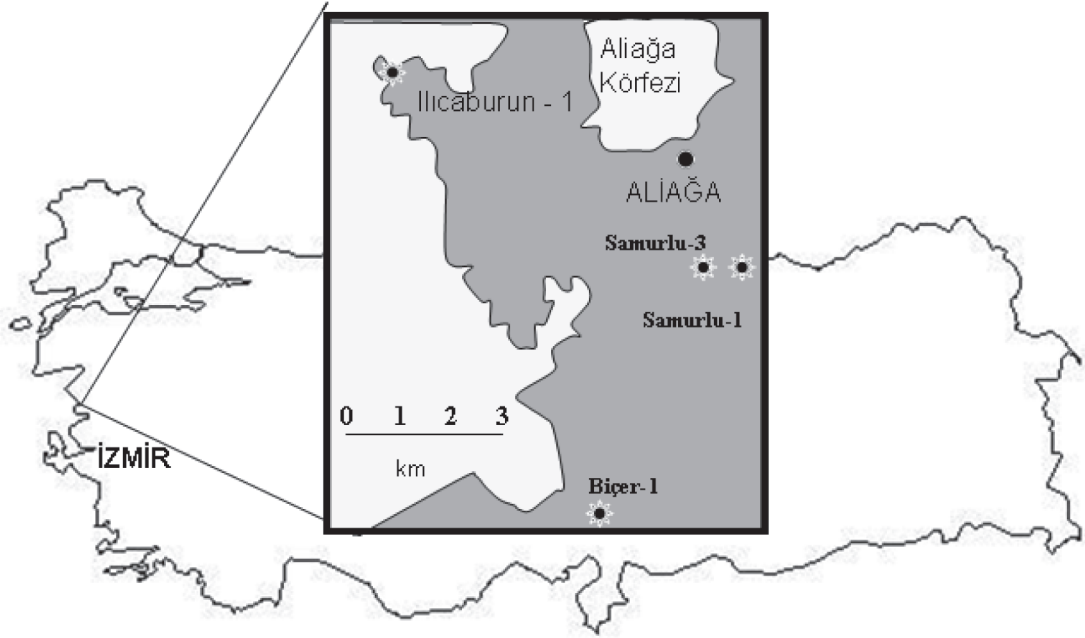
Gerek söz konusu kuyulardan alınan karot, gerekse yüzeyden alınan kayaç örnekleri üzerinde yapılan hidrotermal alterasyon çalışmaları özellikle jeotermal alanlarda jeotermal akışkan ile ana kaya etkileşimlerini ve bu süreçte gelişen jeolojik olayları açıklamada kullanılan yaygın yöntemlerden biridir ( Browne vd., 1992; Şener ve Gevrek, 2000). Montmorillonit, kaolinit, illit, klorit, epidot ve adularya gibi hidrotermal alterasyon sonucu oluşmuş mineral birliktelikleri jeotermal rezervuar sıcaklığı, akışkanın taşınması sırasında borularda oluşabilecek korozyon ve kabuklaşma, permeabilite ve alanının akışkan kimyası hakkında bilgiler sunmaktadır.

Bu bilgiler ışığında yapılan çalışmada, Aliağa jeotermal sahasında gözlenen hidrotermal

alterasyonların ayrıntılı olarak saptanması ve jeotermal sistemi oluşturan termal sularla ilişkisinin ortaya konularak su-kayaç etkileşimlerinden hareketle rezervuar sıcaklığı hakkında öngörülerde bulunulması amaçlanmıştır. Önceki çalışmalarda yer verilmeyen bu amaç doğrultusunda çalışma sahasında yüzeylenen kayaçların mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri ile termal suların hidrojeokimyasal özellikleri birlikte değerlendirilmiştir. Jeokimyasal ve petrografik analizler 17 adet karot ile 52 adet yüzey örneğinde, Hidrojeokimya analizleri ise 10 adet termal su örneğinde yapılmıştır.

## JEOLOJİ

Çalışma alanı ve yakın yöresinde gözlenen en önemli jeolojik unsurlar Menderes Masifi, İzmir-Ankara-Erzincan Kenet Kuşağı, Yuntdağı volkanitleri ve Neojen çökelleridir. Tüm Batı Anadolu'da temeli oluşturan Menderes Masifi metamorfik kayaçları çalışma alanında, Üst Santoniyen - Alt Maestrihtiyen yaşlı İzmir Flişi tarafından allokton olarak örtülmektedir. Allokton İzmir Flişi üzerine gelen birimler Miyosen yaşlı karasal, gölsel ve volkanosedimenter çökellerdir. Çalışmanın amacını oluşturan hidrotermal alterasyonların yoğun olarak gözleendiği ve yaşları Orta-Üst Miyosen'den başlayıp Pliyosen'e kadar uzanan volkanik istif Alt Miyosen üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır. Kuvaterner ise, alüvyon ve yamaç molozu



Şekil 1. Çalışma alanı ve jeotermal sondaj lokasyon haritası  
Figure 1. Location map of study area and location of the geothermal drill holes

şeklinde gözlenmektedir (Şekil 2). Bölgede Miyosen yaşlı kayaların tabanını Güzelhisar formasyonuna ait birimler oluşturur. Bu birimlerin üzerine gölsel çökeller içeren Zeytindağ formasyonu veya uyumsuz dokanakla Foça tüfü (aşmalı olarak Aliğa kireçtaşı) gelir. Zeytindağ formasyonu üzerinde Foça tüfü ve tüflerin üzerine de uyumlu dokanakla Aliğa kireçtaşı birimi gelmektedir. En üstte, Kuvaterner yaşlı güncel çökellerle istif tamamlanır.

Ege Bölgesi, günümüzde tektonik açıdan aktif bir bölgedir. Arabistan ve Avrasya levhalarının, Bitlis Kenet Kuşağı boyunca çarpışmaları ve yaklaşmaya devam etmelerinin, Erken Miyosen'den itibaren Doğu Anadolu kıta kabuğunu kısaltıp kalınlaştırdığı bilinmektedir. McKenzie (1972), Tokay (1973), Alptekin (1978), Dewey ve Şengör (1979), Şengör (1979, 1980)'e göre, Arabistan ve Avrasya levhalarının çarpışmasının yarattığı sıkışma nedeni ile, Anadolu levhası Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu transform faylarının Karlıova birleşme noktasından itibaren batıya doğru itilmiştir. Ege Bölgesi günümüzde de bu hareketin etkisi altında bulunmaktadır. GPS verilerine göre

Anadolu levhası, doğuda ve iç kesimlerde batı yönünde yaklaşık 18-22 mm/y, batıda ise saatin tersi yönünde bir rotasyonal hareketle, yılda 40 mm hızla Ege hendeğine doğru ilerlemektedir (Müller vd., 1997).

### ANALİTİK YÖNTEMLER

Çalışma alanında 1/25000 ölçekli topoğrafik haritalar kullanılarak ve önceki genel jeoloji çalışmalarından yararlanılarak arazinin jeolojisi incelenmiştir (Kaya, 1978, 1979, 1983; Eşder vd.,1991; Dönmez vd.,1998; Akay, 2000). Çalışmada, Kaya (1978) 'nın kurguladığı Neojen stratigrafisi kısmen revize edilerek benimsenmiş ve jeoloji haritaları değiştirilmeksizin kullanılmıştır (Şekil 3). İnceleme alanındaki farklı jeotermal alanlarda açılan sondajlardan 17 adet karot örneği ve alterasyonun yoğun gözlemlendiği alanlardan ise 52 adet kayaç örneği olmak üzere toplam 69 adet kayaç ve 10 adet termal su örneği alınmıştır. Karot ve kayaç örneklerinin mineraloji-petrografi analizleri Dokuz Eylül Üniversitesi, aynı örneklerin toz preparat haline getirilerek Atomik Absorbsiyon Spektrometre

ZAMAN	DEVİR	DEVRE	SİMGE	FORMASYON	ÜYE	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMA	
S E N O Z O Y I K	Kuvaterner		Al				Eski, yeni alüvyon vb. oluşuklar	
		M I Y O S E N	Ma	Aliğa Kireçtaşı	Ilıpınar Bazaltı			Sarı, yeşil ve beyaz renkli gösel killi kireçtaşı
	Mf		Foça Tüfü	Sarıkaya Riyoliti			Az oranda riyolit, hyaloklastik riyolit breşi, perlit ve volkaniklastik çakıltaşı ve kumtaşı içeren kalkalkalen riyolitik tüf	
	Mz		Zeytinadağ Formasyonu	Şakran Üyesi				İnce kömür aradüzeyle, fosil içerikli gösel kireçtaşı, kalkerli çamurtaşı, kiltası ve az miktarda literanit araldanması
				Samurlu Volkanitleri				
				Bozalan Üyesi				
Mk	Kozbeyli Tüfü				Felsik kristal ve parçalı tüf			
Msg	Güzelhisar Formasyonu				Riyodasit-dasit-andezit-latitandezit, riyodasit-dasit bileşimli lav, az miktarda lav breşi ve aglomera			

Şekil 2. İnceleme alanının genelleştirilmiş dikme kesiti (Kaya, 1978'den değiştirilerek).

Figure 2. Generalized geological columnar section for the study area (adapted from Kaya, 1978).

yöntemi kullanılarak yapılan ana oksit ve iz element analizleri ile su kimyası analizleri MTA, X-Ray Difraktometre yöntemi ile yapılan mineral analizleri ise Hacettepe Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

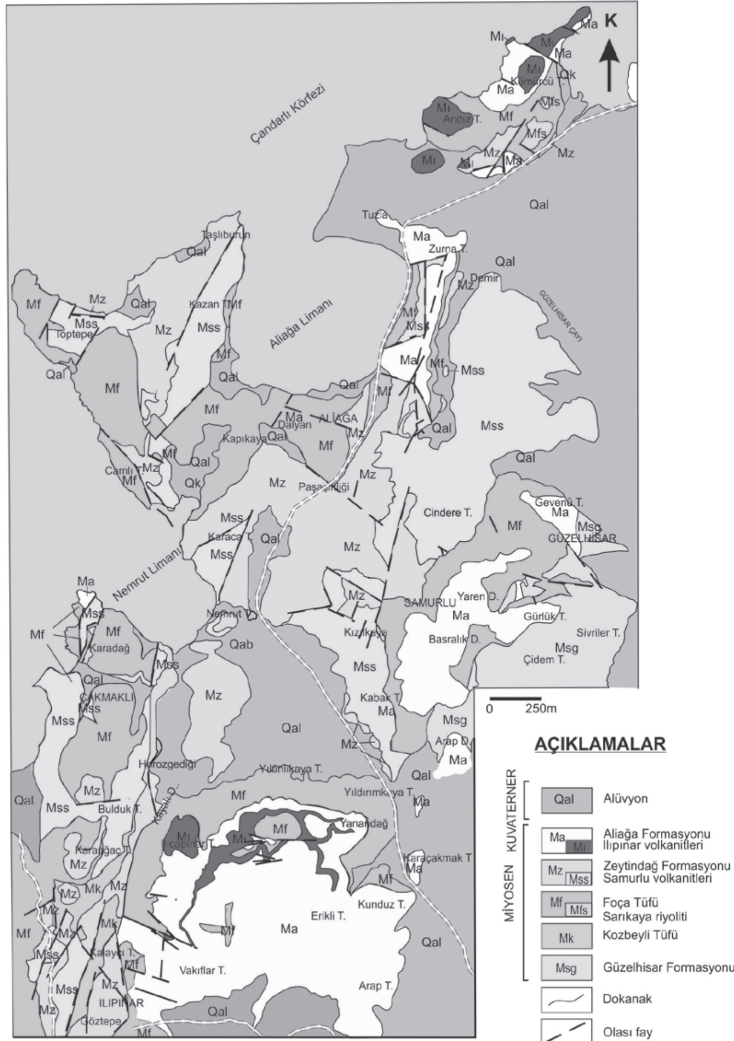
### Çalışma Sahasında Bulunan Kayaçların Petrografisi

Çalışma alanında tüf, andezitik tüf, bazaltik andezit, bazalt ve kireçtaşı litolojilerinden oluşan ve aşağıda detaylandırılan dört ayrı formasyon ile iki üye olarak ayırtlanan altı ana kaya birimi bulunmaktadır. Bu kayaçların zayıflık zonlarından ve sıcak su kaynaklarına yakın kesimlerden

alınan örneklerin mikroskobik incelenmesi ve daha önce bölgede yapılan çalışmalardan elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek kayaçların minerolojik-petrografik ve jeokimyasal özellikleri belirlenmiştir.

### Güzelhisar Formasyonu

Örnekler porfirik dokulu olup, plajiyoklaz, biyotit, amfibol, az miktarda piroksen, çok az da olivin fenokristalleri bulunmaktadır. Plajiyoklazlar özşekilli, ancak alterasyona maruz kalmalarından dolayı kenarlarından itibaren killeşmişlerdir. Bazı fenokristallerde silisleşme açıkça gözlenir. Amfibol fenokristalleri, özşekilli ve yarı



Şekil 3. Çalışma alanı ve yakın civarının jeoloji haritası (Kaya, 1978)  
Figure 3. Geological map of the study area and its close vicinity (from Kaya, 1978).

özşekillidir. Çoğu opaklaşmıştır. Biotit fenokristalleri yarı özşekilli ve özşekilsizdir ve bunlarda da opaklaşma gözlenmektedir. Piroksenler özşekilsiz ve parçalanmış durumdadırlar. Hamur, mikrokristalen-felsitik yapı sunmaktadır. Camsı hamur içerisinde fenokristallerin yanısıra silisifiye kayaç parçaları, opak mineraller ve bol miktarda plajiyoklaz mikrolitleri bulunmaktadır. Alterasyon çok yoğun gözlenmektedir. Hamurda yer yer killeşme ve karbonatlaşmalar gözlenir. Bazı örneklerin çatlaklarında silisleşme, karbonatlaşma ve yoğun kloritleşme gözlenmektedir. Formasyon içerisinde bulunan perlitlerde yoğun silisleşmeler gözlenir.

### Zeytinadağ Formasyonu

Zeytinadağ formasyonu'nun volkanitlerle olan dokanaklarında ve yakın çevresinde silisleşme yoğun olarak gözlenmektedir. Özellikle Samurlu üyesi ile olan dokanaklarında bu süreci gözlemlemek olanaklıdır. Tüfit ara katkılı Zeytinadağ formasyonunun killi kireçtaşı düzeyleri, silisçe zengin hidrotermal akışkanların dolaşımı sonucu tamamen silisleşmiştir. Eşder vd. (1991)'nin Zeytinadağ formasyonundan aldıkları kayaç örneklerinin XRD analizlerine göre kaolinit, montmorillonit, kuvars ve kalsit gibi alterasyon mineralleri belirlenmiştir.

### Samurlu Üyesi

Örnekler porfirik dokulu olup, plajiyoklaz, olivin, az miktarda piroksen fenokristalleri içermektedir. Polisentetik ikizli ve zonlu yapıdaki iri plajiyoklaz fenokristalleri boldur. Olivinler, özşekilli, yarıözşekilli ve özşekilsiz kristaller halinde gözlenirler. Piroksenler ise (klinopiroksen-ojit), özşekilsizdir ve tek tek kristaller halinde gözlenebildiği gibi glomeroporfiritik dokuda topluluklar halinde de gözlenebilirler. Hamur intersertal dokuda olup, volkanik cam, plajiyoklaz mikrolitleri, granüle olivin ve piroksenlerce doldurulmuştur. Toplu halde bulunan olivinlerin aralarındaki boşluklarda plajiyoklaz kristalleri gözlenir. Devitrifiye olmuş hamurda yer yer karbonatlaşma gözlenmektedir. Plajiyoklaz fenokristallerinde kaolinleşmeler mevcuttur.

### Foça Tüfü

Foça tüfünden alınan 5 adet örnekte yapılan petrografik incelemeler sonucunda hidrotermal alterasyon izlerine rastlanmıştır. Örnekler porfirik dokuludur. Fenokristalleri plajiyoklaz, biyotit, kuvars, alkali feldispat ve devitrifiye olmuş cam parçalarından oluşmaktadır. Fenokristallerden bazıları Fe'li solüsyonlar tarafından boyanmıştır. Alkali feldispatlar ve plajiyoklazlar yarı özşekilli ve özşekilsizdir. Biyotitler, özşekilli ve yarı özşekilli olarak gözlenirler. Hamur, tamamen devitrifiye olmuş volkanik camın oluşturduğu ince kül malzemedan oluşmuştur. Kriptonkristalen felsitik bir doku sunmaktadır. Hamurun içerisinde orta-kaba kül ve ince-orta lapilli pümeks, cam parçaları, litik kırıntılar ve kristaller bulunmaktadır. Litik kırıntıların killeşmiş olduğu gözlenmektedir. Tüfün içerisinde bulunan çatlaklara yerleşen silis ışınal yapılar sunmaktadır. Örnekler fay zonundan alındığı için, karbonat bağlayıcılı breş parçalarından meydana gelen camı bir tüf görünümündedir. Hamurda da yer yer karbonatlaşma ve killeşmeler gözlenmiştir. Plajiyoklaz ve biyotit mikrolitlerinin oluşturduğu ri-yolitik akma izlerine rastlamak mümkündür.

Eşder vd. (1991)'nin K17-c2 paftasının güneydoğusunda Kirpi çukuru mevkiinden aldıkları örneklerin X ışınımı analizleri sonucunda, montmorillonit-illit-kalsit ve kuvars mineralleri, Foça tüfü içerisinde gözlenen

Sarıkaya ri-yolitinden almış oldukları örneklerde ise, montmorillonit-illit-feldispat-kristobalit-muskovit mineralleri tanımlanmıştır. Foça Tüfü'ndeki silisleşmeler çalışma sahasının batısında yer alan Taşlıburun mevkiinde açıkça izlenmektedir.

### Aliağa Kireçtaşı

Aliağa kireçtaşı biriminden alınan altı adet örneğin petrografik incelemelerine göre, bunların mikritik kireçtaşı oldukları saptanmıştır. Samurlu köyü çevresinden alınan örneklerin bütünüyle mikritik kireçtaşı, Aliağa kıyı şeridinden (Buruncu) alınan örneklerin ise mikrosparitik karbonat minerallerinden oluştuğu gözlenmiştir. Mikritik kireçtaşı örneklerinde az oranda biyoklast izlerine rastlanmıştır. Boşalan biyoklastların içleri genellikle ikincil oluşumlu ışınal silis, bazen de spar kalsit ile doldurulmuştur. Demirli çözeltilerin etkisi ile opaklaşmış mineraller de bulunur, bazı örneklerde bunlar dendritik yapı sunarlar.

### Ilıpınar Bazalt Üyesi

Örnekler porfirik dokuludur. Fenokristalleri, olivin, biyotit az miktarda piroksendir. Egemen fenokristal olan olivinler yarı özşekilli ve özşekilsiz kristaller halinde gözlenirler. Biyotitler yarı özşekilli ve opaklaşmıştır. Hamur, intersertal dokuda olup, plajiyoklas mikrolitleri ve opak mineraller içerir. Plajiyoklaz mikrolitleri, taneli piroksen ve olivinler volkanik cam içerisinde yer alırlar. Hamurdaki volkanik cam ve mafik mineralerde yer yer karbonatlaşma gözlenir. İçleri kısmen boşalmış olivinlerin boşluklarında silisleşme ve karbonatlaşma gözlenmektedir ve sferolitik dokulu silis yerleşimleri mevcuttur. Ayrıca serpantinleşme sonucu bazı olivinlerin kristal dış yüzeyinden içe doğru iddingsitleşme izlenir. Biyotitlerde ise opaklaşma mevcuttur.

### JEOKİMYA

Bir jeotermal sistemi oluşturan unsurlar; Isı kaynağı, ısıyı taşıyan akışkan, rezervuar zon, örtü kaya olarak sıralanabilir. Aliağa jeotermal sisteminin de sondajlarla elde edilen sıcak su ve mevcut kaynakları ile bu koşulları sağladığı gözlenmektedir. Bu yüzden Aliağa jeotermal



sisteminde hidrotermal alterasyon minerallerini tespit etmek, bu minerallere göre sistemin hazne sıcaklığını belirlemek ve kaya birimlerinde meydana gelen kimyasal değişimleri belirlemek ve mevcut bilgilerle denestirmek için yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre belirlenen ana oksit değerleri Çizelge 1’de, iz element analiz değerleri ise Çizelge 2’de verilmiştir. Örneklerin tümü altere olduğu için analiz değerleri toplamı 100 olmamaktadır.

Çizelge 1’de verilen analiz sonuçları, Şekil 4’deki bileşimsel sınıflama ve adlama diyagramlarına işlenmiştir. Bu diyagramlardan da görüleceği gibi, çalışma alanında yer alan Zeytindağ formasyonu volkanitleri Irvine ve Baragar (1971)’in diyagramlarında subalkalen alana düşer ve toleyitik-kalkalkalen sınırında gözlenir. Aynı zamanda bu volkanitler Cox vd. (1979)’nin adlama diyagramında ise, trakiandezit alanına düşmektedir. Bu çalışma kapsamında, alınan örneklerin kimyasal analiz sonuçlarına göre Foça tüfünün subalkalen ve (toleyitik alana düşen 1 adet örnek dışında) kalkalkalen karakterde olduğu görülmektedir (Şekil 4). Çizelge 1’deki Güzelhisar formasyonuna ait örneklerin Irvine ve Baragar (1971)’a ait diyagramlardaki yerleri incelendiğinde, bunların da subalkalen karakterde ve toleyitik/ kalkalkalen geçişli oldukları anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 4).

Çizelge 2’de inceleme alanındaki volkanik kayaların iz element içerikleri, çeşitli araştırmalara göre saptanmış ortalama kabuk değerleri ile karşılaştırılırsa örneklerin Ba, Sr, Rb, La, K, Sn, Pb, As, Pb Th, U içeriklerinin görece yüksek oldukları görülür (Wedepohl vd., 1974, Kistler vd., 1971).

## HİDROTERMAL ALTERASYON

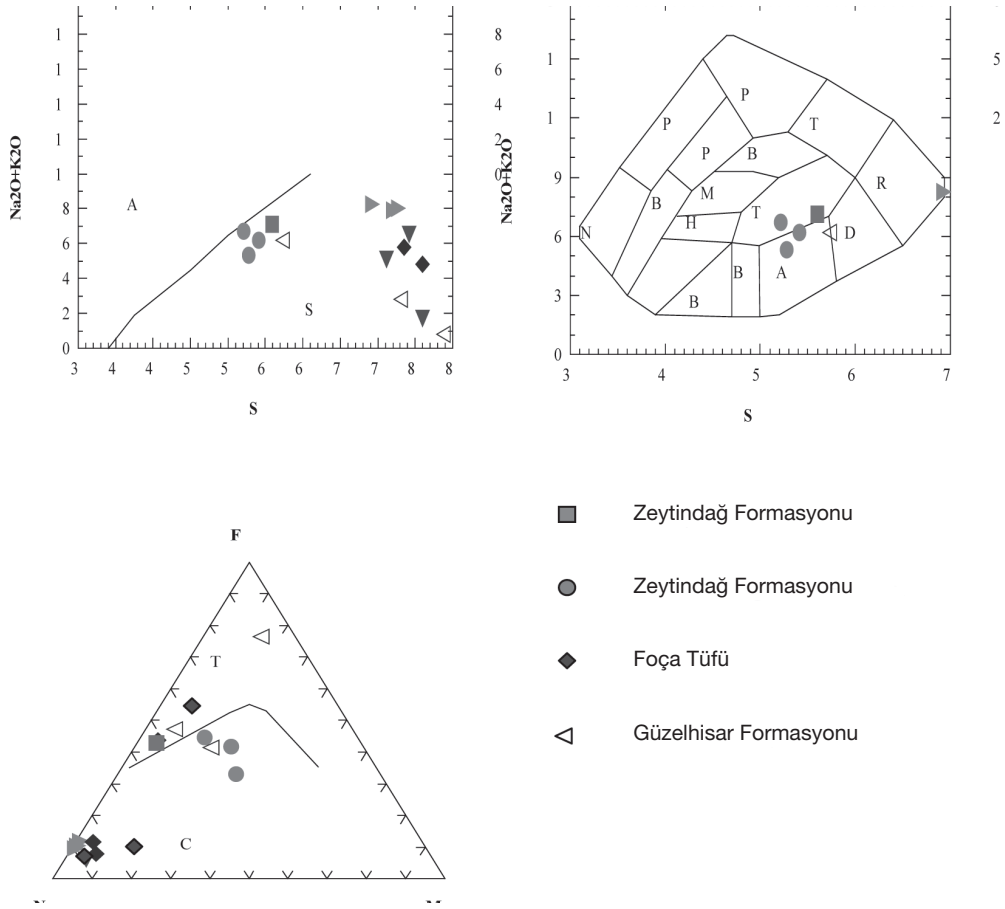
Sıcak suların yüzeyde oluşturduğu alterasyon, derinlerde meydana getirdiği hidrotermal alterasyon ile aynı değildir. Çünkü derinlerden kırık ve çatlaklar yoluyla yukarı yükselen akışkana, yüzeye yakın kesimlerde soğuk yeraltı sularının ve deniz suyunun karışması ile akışkan sıcaklığında azalma olur ve dolayısıyla bileşiminde de değişimler meydana gelir.

İnceleme alanında Habaş ve Çukurova gibi kuruluşlar tarafından Foça tüfü içerisinde açılan kuyularda 45-60 m derinliklerde 38-45 °C’lık ılık ve sıcak su elde edilmiştir. Bu da öncel çalışmalarda örtü kayaç olarak öngörülen Foça tüfünün geçirgen ve gözenekli kısımlarında sıcak suyun dolaştığını göstermektedir. Çoğu jeotermal alanda kayaçların hidrotermal alterasyonu, derinlik, sıcaklık, gözeneklilik ve kimyasal koşulların değişimine bağlı olarak zonlanma gösterir. Bir hidrojen sülfürün sülfirik asite

Çizelge 1. İnceleme alanından alınan kaya örneklerinin ana oksit değerleri.

Table 1. The major oxide results of rock samples taken from the study area

FORMASYON ADI	ÖRNEK NO	ANA OKSİT DEĞERLERİ									
		Na <sub>2</sub> O %	MgO %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %	CaO %	TiO <sub>2</sub> %	MnO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %
Foça Tüfü	1a	0.6	0.3	9.7	78.5	<0.1	5.2	1.2	<0.1	1.1	0.9
	2a	0.2	0.2	4.7	88.0	<0.1	1.9	0.6	<0.1	<0.1	2.0
	3	0.1	0.4	9.1	81.0	<0.1	4.7	0.8	<0.1	<0.1	0.5
	4	0.1	0.5	0.7	3.1	<0.1	0.1	52.8	<0.1	<0.1	0.4
Aliağa Kireçtaşı	9a	<0.1	1.6	<0.1	1.2	0.1	<0.1	5.8	<0.1	<0.1	0.1
	9b	0.3	0.8	1.1	17.5	<0.1	0.4	41.8	0.1	0.1	3.8
S.yer Formasyonu	6	3.0	0.7	17.1	61.0	0.4	4.1	4.2	1.1	<0.1	6.5
	8a	1.0	1.4	8.0	78.1	0.2	1.8	2.0	0.5	0.1	3.3
Güzelhisar Formasyonu	8b	2.6	1.0	15.6	62.3	<0.1	3.6	4.2	0.8	<0.1	7.2
	8c	0.1	1.4	2.0	83.8	0.1	0.7	0.7	0.1	<0.1	7.9
	5a	<0.1	<0.1	0.1	95.6	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	2.5
Aliağa K.taşı içerisinde silislenmiş zon	5b	<0.1	9.0	0.3	53.5	<0.1	0.1	14.5	<0.1	0.4	2.0



Şekil 4. Foça tüfü, Zeytindağ formasyonu ve Güzelhisar formasyonu volkanitlerinden bu çalışma kapsamında alınan örneklerin kimyasal analiz sonuçlarının a) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971). b) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O diyagramı (Cox vd., 1979). c) FeO-T-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-MgO diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971).

Figure 4. Current results reported by this study for the Foça tuffite, volcanites of the Zeytindağ and Güzelhisar Formations: a) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O diagram (Irvine and Baragar, 1971), b) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O diagram (Cox et al, 1979), c) FeO-T-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-MgO diagram (Irvine and Baragar, 1971).

oksidasyonu ile oluşan asidik suların yarattığı alterasyon, yüzeyde arjilik alterasyonu meydana getirir. Daha derindeki alterasyon türü; serizitik, pirofillitik veya potasyum silikat alterasyonudur. Çalışma alanında da ileri arjilik, arjilik ve dış pirofillitik alterasyon olmak üzere üç farklı alterasyon türü saptanmıştır. Bu alterasyon türleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

### İleri Arjilik Alterasyon

#### Silika grubu

İnceleme alanında asit koşulların etkisiyle meydana gelen düşük sıcaklıklı (<100 °C) bir silika alterasyonu mevcuttur ve baskın olarak opal, kristobalit mineralleri bulunur. Çizelge 3'deki

X-ray difraktometre sonuçları incelendiğinde, 1a, 2a, 3, 5a, 5b, 9c, 8a, 8b, 8c ve 7 nolu kayaç örneklerinde opal ve kristobalitin birlikte bulunduğu gözlenmektedir. Bu kısım, muhtemelen silisçe aşırı doymun düşük sıcaklıklı suların meydana getirdiği bir yüzey zonudur. Opalin silikanın yanında kuvarsın da bulunduğu 1a, 2a, 3, 5a, 5b, 7, 8c ve 9c örnekleri, muhtemelen sıcaklık ve derinliğin daha fazla olduğu kesimlerdir.

### Arjilik Alterasyon

#### Kaolinit grubu

Kaolinit grubu mineraller ile temsil edilir. Çizelge 3 'de 12a, 12b, 12c ve 13 nolu örneklerde kaolinit ve kuvars birlikte bulunurlar ve kaolinitin



Çizelge 2. İnceleme alanından alınan kaya örneklerinin iz element değerleri.

Table 2. Trace element contents of rock samples taken from the study area

(ppm)	Foça Tüfü				Aliağa Kireçtaşı		Sarıyer		Güzelhisar			A.k. İçerisinde silisleşmiş zon	
	1a	2a	3	4	9a	9b	6	8a	8b	8c	5a	5b	
F	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	< 1500	
Sc	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	21	< 20	< 20	66	< 20	< 20	
V	13	30	< 10	<10	<10	39	190	93	158	121	11	95	
Cr	<60	117	<60	<60	<60	90	93	78	531	<60	1545	63	
Co	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	85	67	<50	
Ni	<30	36	<30	<30	<30	50	65	51	60	58	74	38	
Cu	<30	33	<30	<30	<30	70	<30	233	54	<30	<30	50	
Zn	14	14	16	12	<10	26	158	50	72	56	34	17	
Rb	197	89	151	<10	<10	<10	210	126	199	99	<10	<10	
Sr	255	190	192	244	187	147	640	273	488	67	16	1161	
Zr	100	49	72	<30	<30	45	387	124	214	79	<30	68	
Nb	36	42	<20	<20	<20	<20	25	<20	<20	22	77	<22	
Ba	940	407	432	<100	<100	165	1273	524	900	192	209	542	
La	<40	<40	<40	91	50	43	60	<40	<40	<40	<40	<40	
Pb	275	32	<20	<20	<20	58	44	28	55	22	<20	115	
Nd	21	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	71	< 20	37	< 20	< 20	< 20	
Yb	<10	<10	<10	<10	<10	<10	12	13	<10	14	<10	<10	
Th	26	<10	25	<10	<10	<10	124	19	11	<10	<10	<10	
U	<10	35	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	

baskın mineral olmasından dolayı kaolinit grubu olarak ayırt edilmiştir. Kaolinit, genellikle 80-190°C gibi düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Corbet and Leach (1997)'e göre kaolinit ve kuvarsın birlikte bulunduğu alan, yaklaşık 100-175°C arasındadır.

#### İllit-kaolinit grubu

Kaolinit grubu ile illit grubu arasında bir geçiş grubudur (Çizelge 3). Hem sedimanter havzalarda, hem de aktif jeotermal sistemlerde bu minerallerin derinlik-sıcaklık ilişkisi üzerine yapılan çalışmalara göre, smektit düşük sıcaklıklarda (<100-150°C), karışık tabakalı illit-smektit yaklaşık 100-200°C arasında, illit yaklaşık 200-250°C'de, serizit 200-250°C'de, fenjit ise >250-300°C arasında meydana gelmektedir (Leach, 1994). Çalışma alanında smektit, 8a, 8b, 8c 9b, 9c ve 10, karışık tabakalı kil mineralleri ise 9b, 9c, 10, 8a ve 8b nolu örneklerinde gözlenmektedir.

#### İllit grubu

İllit grubu, arjilik zon içerisinde yer alır. Akışkan pH'nın 4 ile 5 arasında olduğu koşullarda, illit grubu mineralleri baskın olarak oluşur (Browne, 1978; Leach, 1994). İllite geçiş yaklaşık 210°C'de gerçekleşir (Browne, 1978, Leach, 1994). Karışık tabakalı illit-smektit killlerinde sıcaklığın artmasıyla smektit içeriği azalır. Çalışma alanında, illit ve smektitin birlikte bulunduğu örnekler, 8a, 8b, 8c ve 9b no'lu örneklerdir (bkz. Çizelge 3).

#### Dış-Pirofillitik Alterasyon

##### Kalk-silikat grubu

Volkanik camların çoğu, zeolitlerin oluşmasına en uygun alümina silikatlardır. Altere riyolitik tüflerde, asitle yıkanma sonucunda ptilolit ve Ca-montmorillonit 100-120°C'de ortaya çıkar. Derinlik ve sıcaklığın artması ile karışık tabakalı

Çizelge 3. İnceleme alanından alınan kayaç örneklerinde X-ray kırınımı (XRD) yöntemi ile belirlenen alterasyon mineralleri.

Table 3. Alteration minerals determined by the X-ray diffraction in rock samples taken from the study area.

Örnek No	Kaya Birimi	Alterasyon Mineralleri
1a	Foça Tüfü	Opal-CT, Höylandit/Klinoptilolit, Feldispat, Kuvars
2a	Foça Tüfü	Opal-CT, Kuvars, Feldispat, Höylandit/ ?Klinoptilolit
3	Foça Tüfü	Opal-CT, Smektit, Feldispat, Kuvars, Höylandit/ ?Klinoptilolit, Karışık tabakalı kil minerali (çok az)
12a	Foça Tüfü	Kuvars, Kaolinit
12b	Foça Tüfü	Kaolinit, Kuvars, Amorf Silika, Mika (?çok çok az), Karışık tabakalı kil minerali (?çok çok az)
12c	Foça Tüfü	Kuvars, Kaolinit
13	Foça Tüfü	Kaolinit, Kristobalit, Kuvars, Feldispat, Amorf Silika, Smektit, Karışık tabakalı kil minerali, Mika (?çok çok az), Klorit (?çok çok az)
5a	Aliağa Kireçtaşı	Kuvars, Opal-CT
5b	Aliağa Kireçtaşı	Dolomit, Opal-CT, Kuvars, Kalsit, Höylandit/ ?Klinoptilolit (çok az), Feldispat (çok çok az)
9b	Aliağa Kireçtaşı	Kalsit, Kuvars, Feldispat, Smektit, İllit, Karışık tabakalı kil minerali
9c	Aliağa Kireçtaşı	Opal-CT, Smektit, Kuvars, Feldispat, Mika, Karışık tabakalı kil minerali, Klorit (? çok çok az)
10	İlipınar Bazaltı	Smektit, Feldispat, Amorf Silika, Analsim, Tridimit, Mika, Kuvars, Karışık tabakalı kil minerali, Serpantin, Amfibol
11	Sarıyer Formasyonu	Feldispat, Amorf Silika, Mika (çok az), Kuvars (çok az), Smektit (çok çok az), Karışık tabakalı kil minerali (çok çok az), Klorit (? çok çok az), Kaolinit (? çok çok az), Amfibol (? çok çok az)
8a	Güzelhisar Formasyonu	Feldispat, Opal-CT, Smektit, İllit, Kalsit, Karışık tabakalı kil minerali
8b	Güzelhisar Formasyonu	Feldispat, Opal-CT, Smektit, İllit, Amorf silika, Götit(?), Kristobalit, Höylandit/ ?Klinoptilolit (çok az), Karışık tabakalı kil minerali
8c	Güzelhisar Formasyonu	Opal-CT, Smektit, Kuvars, Feldispat, İllit (çok az)
7	Güzelhisar Formasyonu	Opal-CT, Kuvars

montmorillonit-illit'e geçiş gösterir (Browne, 1978; Leach, 1994). Genelde 100-150°C arasında oluşan höylandit çalışma alanında pek çok örnekte saptanmıştır.

Silisleşme ve kaolinitik alterasyon Foça tüfü içerisinde yaygındır. Eşder vd. (1991) tarafından incelenen K17-b3 paftasının kuzeybatısında, İlıcaburun mevkiinde Foça tüfü içerisinde gözlenen fay zonunda, birbirine paralel olarak oluşmuş, sonradan koyu kahve renge dönüşmüş silisifiye düzeylerin İlıcaburun kaynağının suyu ile ilgili olmadığı, İlıcaburun'daki kaynağın oluşmasına neden olan fayın, eski alterasyon ürünü olan silisifiye düzeyleri kestiği ileri sürülmüştür. Bu silisifiye zonlar, geçmişteki bir jeotermal sistemin izlerini taşımakta ve montmorillonit-illit geçişini göstermektedirler. Eşder vd. (1991),

geçiş zonuna göre paleojeotermal sistemde akışkan sıcaklığının 180-200°C arasında bulunduğunu ileri sürerler. İlıcaburun'dan alınan 12a, 12b, 12c ve 13 nolu tüf örneklerinde, sadece kuvars ve kaolinit mineralleri belirlenmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde, kuvars ve kaolinitin birlikte bulunduğu alan arjilik zonun içerisinde yer alır. Bu alanın gösterdiği sıcaklık yaklaşık 100-175°C arasındadır. Paleojeotermal sistem için 175°C'ye ulaşan hazne kaya sıcaklığı normal gözükmemektedir.

## HİDROJEOKİMYA

Çalışmamızın amacı doğrultusunda farklı sıcaklıklara sahip, soğuk, ılık ve sıcak, suların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Aliğa ve çevresinde yer alan ılık ve sıcak suların kimyasal bileşimleri

Table 4. Chemical compositions of warm and hot waters found in the Aliğa and its surrounding area

No	Kaynak No	T °C	Ph	EC	TDS mg/l	Ca+2 mg/l	K+ mg/l	Mg+2 mg/l	Na+ mg/l	Li mg/l	B mg/l
1	SM-1	90	8.86	4500		4,5	52,5	2,4	600	-	16
2	TE-1	56	6.1	32000	22779	741	220	720	6350	2.5	14
3	TE-2	25	7.1	47000	43300	401	380	1512	12200	0.14	5
4	TE-3	30	7.99	3000	1612	32	22	102	370	0.62	5.2
5	TE-5	25	7.49	2100	950	84	15	63	250	0.75	5.8
6	TE-6	25	7.2	4300	2304	20	48	102	700	2	14.6
7	TE-9	39.8	7.64	2600	1576	48	28	66	470	1	9
8	TE-10	42.4	7.68	2700	1548	52	30	58.4	475	1.2	10
9	KÇ-4	35	7.7	2800	1564	68	0.6	36	480	1.2	8.9
10	KÇ-5	26	7.88	1900	1212	51	0.3	136	125	0.3	0.1

No	Kaynak No	SiO <sub>2</sub> mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	F mg/l	Cl mg/l	Br mg/l
1	SM-1	103	622	129	-	377	-
2	TE-1	4.5	830	1250	1.7	12000	42
3	TE-2	2	183	3160	2.5	22200	91
4	TE-3	62	805	91	0.95	430	1.6
5	TE-5	5	616	10	0.65	238	1.3
6	TE-6	62	1525	67	1.5	580	1.9
7	TE-9	47	1000	22	1.3	406	1
8	TE-10	49	1085	18	2.1	400	2.5
9	KÇ-4	49	1068	16	2	342	1.5
10	KÇ-5	41	561	65	0.4	185	1

Çizelge 4 incelendiğinde çalışma alanında bulunan suların çoğunluğu Na-HCO<sub>3</sub>'lü, bir kısmı da Na-Cl 'lüdür. pH değerleri ise, 6.1'den 8.9'ya kadar değişir ve genellikle nötr veya nötre yakındır. Sazlıdere (TE-3), Gavur Hamamı (TE-2), Uyuz kuyusu (TE-5 ve TE-6) gibi ılık kaynak ve Aliğa Ege Gübre gibi (KÇ-4 ve KÇ5) ılık artzyen kuyuları bulunmaktadır. Jeotermal aktivite açısından, Ilıcaburun kaynağı (TE-1) ve Çukurova (TE-9 ve TE-10) kuyuları Samurlu (SM-1) ve çevresinde yapılmış sondajlar önemli sayılırlar. Bu sondajlardan elde edilen sıcaklıklar 35-96°C arasında değişmektedir.

### Termal Suların Doymuluk İndisleri

Suların üretimi ve kullanımı sırasında ortaya çıkabilecek kabuklaşma ve korozyon gibi etkilerin önlenmesi açısından suların sülfat minerali,

kalsit ve dolomit gibi çökel minerallere ne kadar doymun olduğunun bilinmesi gerekir. Ayrıca bu minerallerden birkaçının birlikte dengede buldukları sıcaklıkların tespit edilmesiyle hazne kaya sıcaklığı hakkında bilgi edinilebilir.

İnceleme alanında yer alan suların kalsit, dolomit vb.nin doymunluk indisleri Perkins vd., (1990) tarafından geliştirilen (SI) Solmineq Bilgisayar programı kullanılarak sıcak suların yüzey pH'ları ve çıkış sıcaklıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çalışma alanında bulunan ılık ve sıcak suların alterasyon minerallerinin sıcaklıkla değişimini saptamak için pH sabit tutularak sıcaklıklar değiştirilmiş ve yeni sıcaklıklara göre SI değerleri Solmineq Bilgisayar programı ile hesaplanmıştır. Bu değerler ve suların oluşturabilecekleri bazı alterasyon mineralleri Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. SM-1, TE-1 ve TE-10 sıcak su örneğinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış mineral doygunluk indisi değerleri .  
 Table 5. Mineral saturation index calculated value for different temperature of hot water samples taken from SM-1, TE-1 and TE-10.

	SM-1							TE-1							TE-10						
	25°C	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C	175°C	25°C	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C	175°C	25°C	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C	175°C
Albit	5,340	3,500	2,100	0,826	-0,185	-0,984	-1,596								4,436	2,776	1,567	0,477	-0,392	-1,123	-1,717
Anhidrit					-0,77	-0,69	-0,47	-0,15	0,24	0,68	1,11										
Aragonit					-0,25	0,06	0,34	0,60	0,85	1,07	1,23										
Höyländit	10,51	6,797	3,817	1,314	-0,619	-2,209	-3,465														
İlit																					
Kalsedon	0,995	0,570	0,213	-0,081	-0,334	-0,536	0,703	-0,84	-1,11	-1,34	-1,54	-1,71	-1,87	-2	0,731	0,362	0,066	-0,168	-0,371	-0,541	-0,69
Kalsit					-0,11	0,19	0,46	0,70	0,94	1,15	1,30										
Kaolinit																					
Kuvars	1,195	0,820	0,463	0,139	-0,144	-0,386	-0,582	-0,41	-0,75	-1,04	-1,30	-1,52	-1,71	-1,89	0,931	0,612	0,316	0,052	-0,181	-0,391	-0,569
K-klinoptilolit	17,16	11,25	6,4	2,332	-1,085	-3,766	-5,890														
Muskovit	11,35	7,184	3,943	1,171	-1,076	-2,867	-4,222														

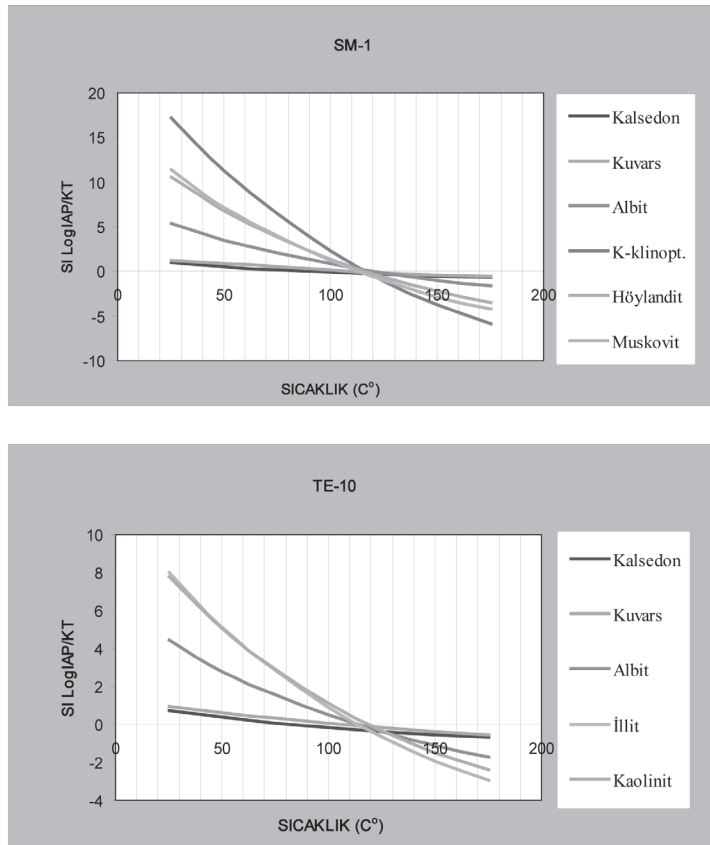
Çizelge 5' de SM-1 örneğinde sıcaklık arttıkça alterasyon minerallerinin doygunluk indisi değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Yani sıcaklık arttıkça bu mineraller suda çözülmeye başlayacaklardır. Kalsedon dışındaki diğer minerallerin 100°C'de artı 125°C'de eksi değerler verdikleri dikkate alınır, minerallerin < 125°C sıcaklıkta çökelmeye başlayacağı anlaşılır. TE-10 örneğinde de aynı özellikler izlenmektedir. İliçaburun (TE-1) örneği deniz suyu karışımı olduğundan dolayı, diğer örneklerle karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır.

Alterasyon minerallerinden birkaçının birlikte dengede bulunduğu sıcaklık hazne sıcaklığı olarak yorumlanmaktadır. Aliağa ve çevresinde yer alan ılık ve sıcak suların doygunluk indisi değerleri Şekil 5'de grafiklere işlenmiş ve hazne sıcaklığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Grafik-

te SM-1 örneği incelenecek olursa, kalsedon, kuvars, albit, K-klinoptilolit, höylandit ve muskovit minerallerine ait eğrilerin yaklaşık 120°C de kesiştikleri gözlenmektedir. TE-10 örneği de aynı özellikler taşımakta ve bütün eğriler yaklaşık 120°C'de kesişmektedirler. Bu yüzden hazne sıcaklığının 120°C ye yakın olduğu söylenebilir. Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde TE-1 nolu su dışında diğer sıcak su örneklerinin yaklaşık aynı hazne sıcaklığını (120°C ) vermektedirler.

### AKTİVİTE DİYAGRAMLARI

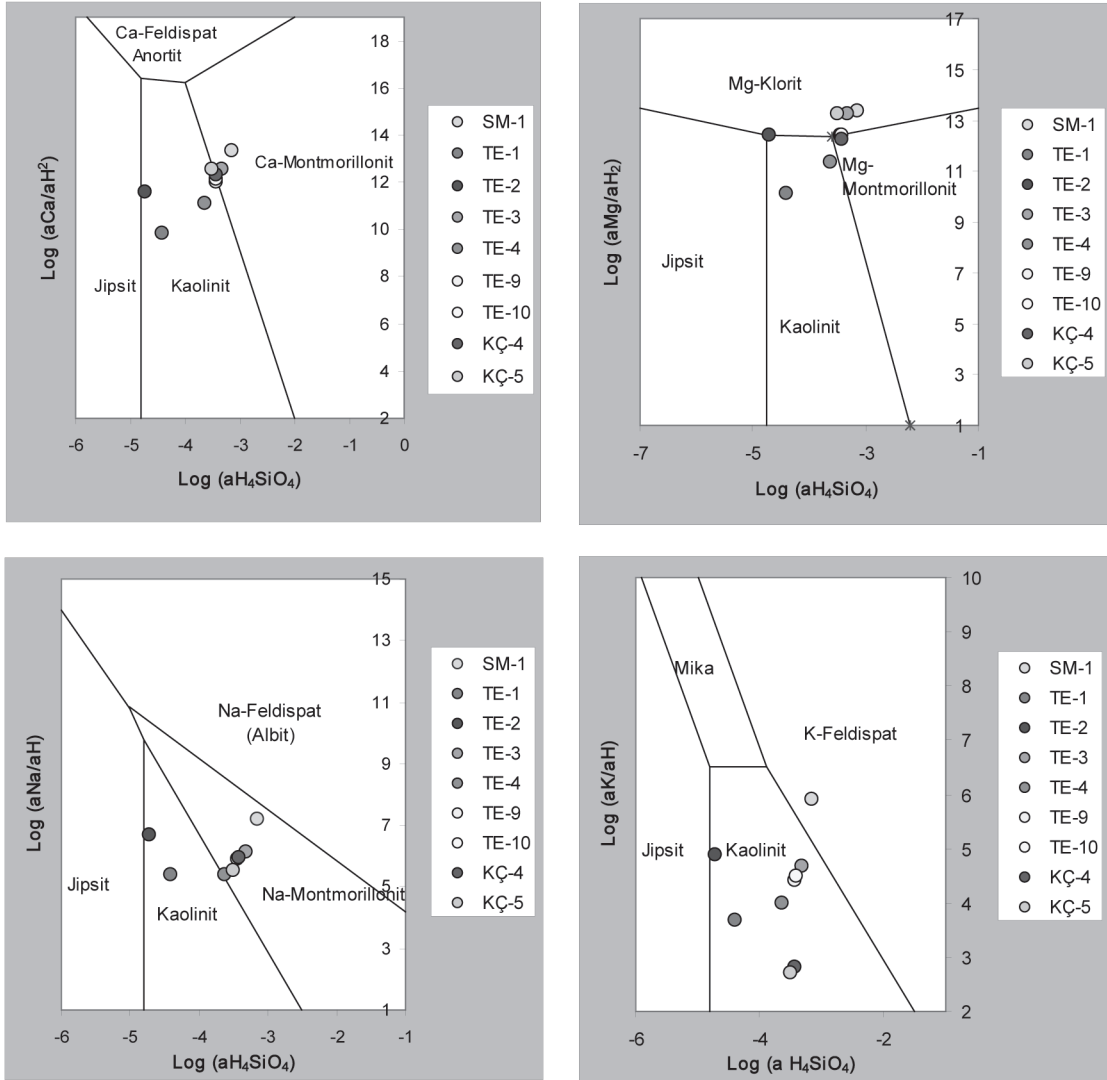
Aktivite diyagramlarından akışkan bileşiminin alterasyon mineralojisine etkisi kolaylıkla izlenebilir. Diyagramlar, su-kayaç etkileşimi sonrasında ortamın mevcut sıcaklık ve pH koşullarında



Şekil 5. SM-1 ve TE-10 nolu sıcak su örneklerinin hidrotermal alterasyon mineralleri için hesaplanan sıcaklık ve doygunluk indisi değerlerinin grafiksel gösterimi.  
Figure 5. Graphics of calculated temperature and saturated indices for hydrothermal minerals of SM-1 and TE-10 thermal water samples.

oluşabilecek ikincil mineraller ve denge durumlarının jeokimyasal yöntemlerle incelenmesinde kullanılır. Bu çalışmada, Helgeson (1969), Helgeson ve Kirkham (1974 a, 1974 b), Helgeson vd. (1978, 1981) tarafından 25° ve Mutlu (1998) tarafından 100°C için oluşturulmuş diyagramlar kullanılmıştır. Diyagramlar üzerine iyon aktivite değerleri yerleştirilerek suların hangi minerallerle dengede bulunabileceği belirlenmiştir.

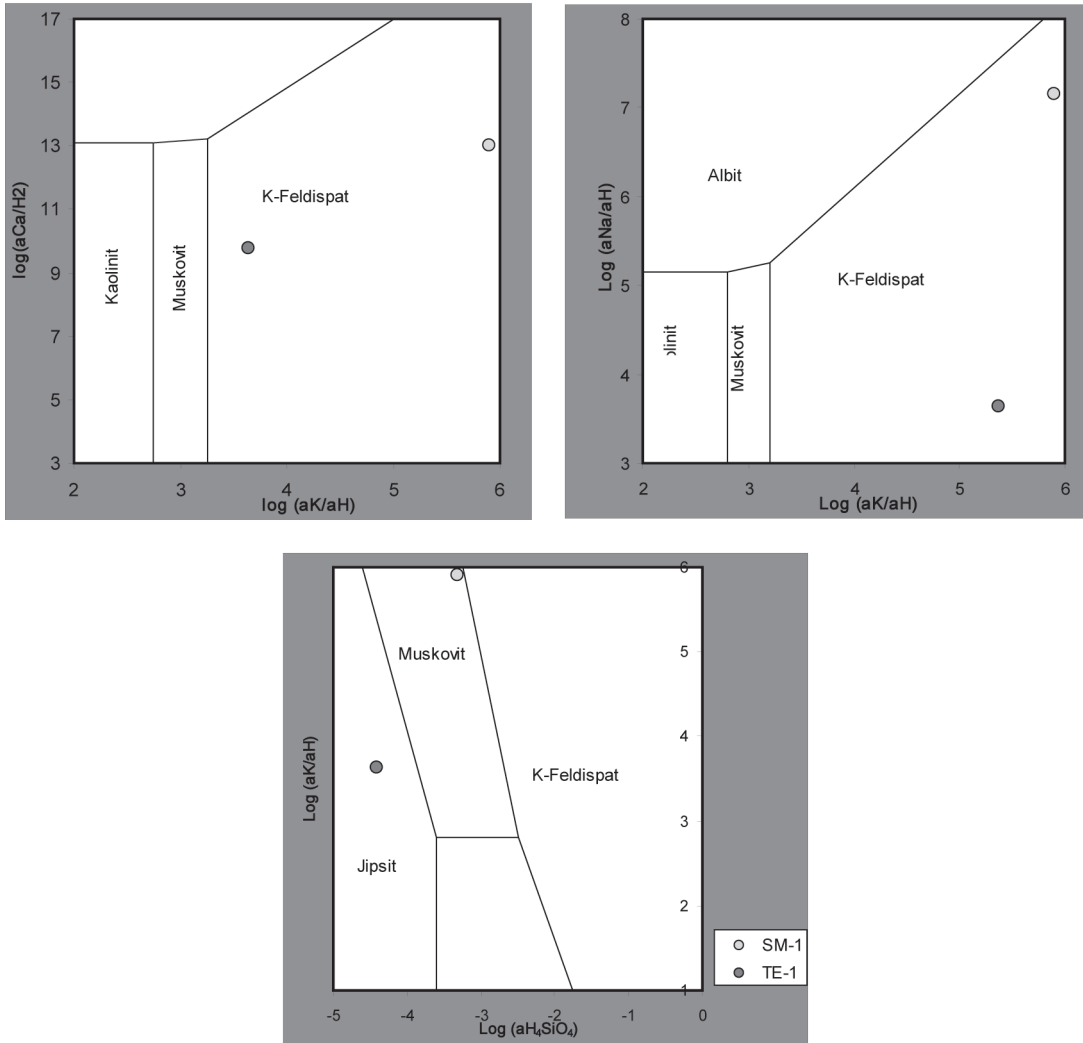
Aliağa jeotermal sisteminde bulunan ılık ve sıcak suların iyon aktiviteleri termodinamik yöntemlerle uyumlu Phreeqc bilgisayar programı ile hesaplanmıştır. Çalışma alanında bulunan suların 25° ve 100°C için iyon aktivite değerleri Şekil 6 ve 7'deki grafikler üzerine işlenerek suların belirtilen sıcaklıklarda hangi minerallerle dengede bulunabileceği farklı sistemler için incelenmiştir. Diyagramlarda suların alüminyum



Şekil 6. İnceleme alanındaki termal suların aktivite diyagramları (25°C, 1 atm):a) Anortit, Ca-montmorillonit, kaolinit ve jipsitin aktivite diyagramları, b) Mg-Klorit, Mg-montmorillonit, kaolinit ve jipsitin aktivite diyagramları, c) Albit, Na-montmorillonit, kaolinit ve jipsitin aktivite diyagramları, d) Mikroklın, Muskovit, kaolinit ve jipsitin aktivite diyagramları.

Figure 6. Activity diagrams of thermal waters found in the study area (for 25°C, 1 atm):a) Activity diagrams of anorthite, Ca-montmorillonite, kaolinite and gypsum, b) Activity diagrams of Mg-chlorite, Mg-montmorillonite, kaolinite and gypsum, c) Activity diagrams of albite, Na-montmorillonite, kaolinite and gypsum, d) Activity diagrams of microcline, muscovite, kaolinite and gypsum.





Şekil 7. İnceleme alanındaki bulunan soğuk, ılık ve sıcak suların aktivite diyagramları (100°C, 1 atm, Mutlu, 1998): a)  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  sistemi, b)  $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  sistemi, c)  $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  sistemi.

Figure 7. Activity diagrams of thermal waters found in the study area (for 100°C, 1 atm, Mutlu, 1998): a)  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  system, b)  $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  system, c)  $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  system.

silikatların alterasyonu sonucunda en fazla gözlenen jipsit, kaolinit, muskovit, albit ve anortit mineralleri ile denge ilişkileri ve bu minerallerin duraylılık alanları incelenmiştir.

Şekil 6'dan da görülebileceği gibi, inceleme alanında yer alan ılık, soğuk ve sıcak suların 25°C ve 1 atmosferde oluşturabilecekleri olası alterasyon mineralleri kaolinit, Ca-montmorillonit, Na-montmorillonit, Mg-montmorillonit ve Mg-Klorittir. 100°C'de ise (bkz. Şekil 7) K-feldispat-Muskovit, Jipsit alanlarına düştükleri gözlenir.

Bu da alanda 100°C'de sıcak suların oluşturabileceği olası alterasyon minerallerinin sistemlerinde K-feldispat-muskovit ve jipsit olabileceğini göstermektedir.

### Jeotermometrelerin uygulanabilirliği

Kasyon jeotermometrelerinin uygulanabilirliği, sıcak suların Giggenbach, (1988) Na-K-Mg üçgen diyagramındaki konumlarına bağlıdır. Deniz suyu karışimli jeotermal akışkanların

hazne sıcaklıklarının tespiti ve akışkan kayaç etkileşim derecesinin belirlenmesi için Giggenbach (1988) tarafından geliştirilmiş olan diyagram, inceleme alanındaki sular için kullanılmıştır (bkz. Şekil 8). Şekil 8'de su örneklerinin çoğunluğu ham sular sınıfına girmektedir. Bu yüzden su örneklerinden tespit edilen hazne sıcaklıklarını dikkate almamak gerekir. SM-1 örneğinin ham sularla kısmen dengede bulunan sular arasındaki sınırdaki yer alması, yeraltı sularıyla karışımı belirtmekte ve su-kayaç arasındaki dengenin tamamlanmadığını göstermektedir.

Diyagramlarda kısmen dengelenmiş sular ile ham suları birbirinden ayıran çizgi, olgunlaşma indisi (MI) 2 olan eş kimyasal özellikteki suların diyagram üzerindeki noktalarının birleşimiyle oluşturulmuştur. İnceleme alanında bulunan suların MI değerleri Çizelge 6' da verilmiştir.

Çizelge 6' da 2'nin altında değerler veren su örnekleri ham suları, 2'nin üzerindeki değerler ise kısmen dengede bulunan suları göstermektedir. Üçgen diyagramda gözlemlendiği gibi çizelgede de TE-4, TE-5, TE-6, TE-9, TE-10 ve KÇ-5 nolu örnekler ham sular sınıfına girmekte ve bu sular için Na-K-Mg jeotermometrelerinin kullanımının güvenilir olmayacağı gözlenmektedir. TE-1 kuyusu, deniz suyu karışımı olmasından dolayı deniz suyunun olgunlaşma indisine yakın değerler vermektedir. Örnekler içerisinde sadece SM-1 ve KÇ-4 örneklerinin olgunlaşma indisleri 2'nin üzerinde olup kısmen dengelenmiş su alanlarına düşerler. Ancak yine bu sularda da katyon jeotermometrelerinin kullanımı uygun değildir.

Su-kayaç dengesinin ve hazne sıcaklığının saptanmasında kullanılan (Giggenbach vd., 1983) tarafından geliştirilmiş bir diğer diyagram ise Na-K-Mg-Ca diyagramıdır (bkz. Şekil 9). Bu kare diyagram sıcak sulardaki Na-K-Mg-Ca iyonlarının miktarlarının termodinamik açıdan tam denge halinde oldukları bir eğri ile ifade olunmaktadır (Marini ve diğ., 1997). Şekil 9'da görüleceği gibi, inceleme alanında analizi yapılan su örneklerinden hiçbiri eğriye yakın düşmemektedir. Bu durum, bölgedeki sıcak sularla kayaçlar arasında dengenin sağlanmadığını ve bu yüzden katyon jeotermometrelerinin kullanımının güvenilir olmayacağını gösterir.

## SONUÇLAR

Aliağa jeotermal sahası, genç volkanik kayalar ve Neojen çökel topluluklarının bir arada bulunduğu bir saha niteliğinde olup, jeotermal sistemi oluşturan jeotermal akışkanlarla kayaç ilişkilerine bağlı olarak gelişen hidrotermal alterasyon Orta-Üst Miyosen yaşlı kayaçlarda yaygın olarak gözlenmektedir.

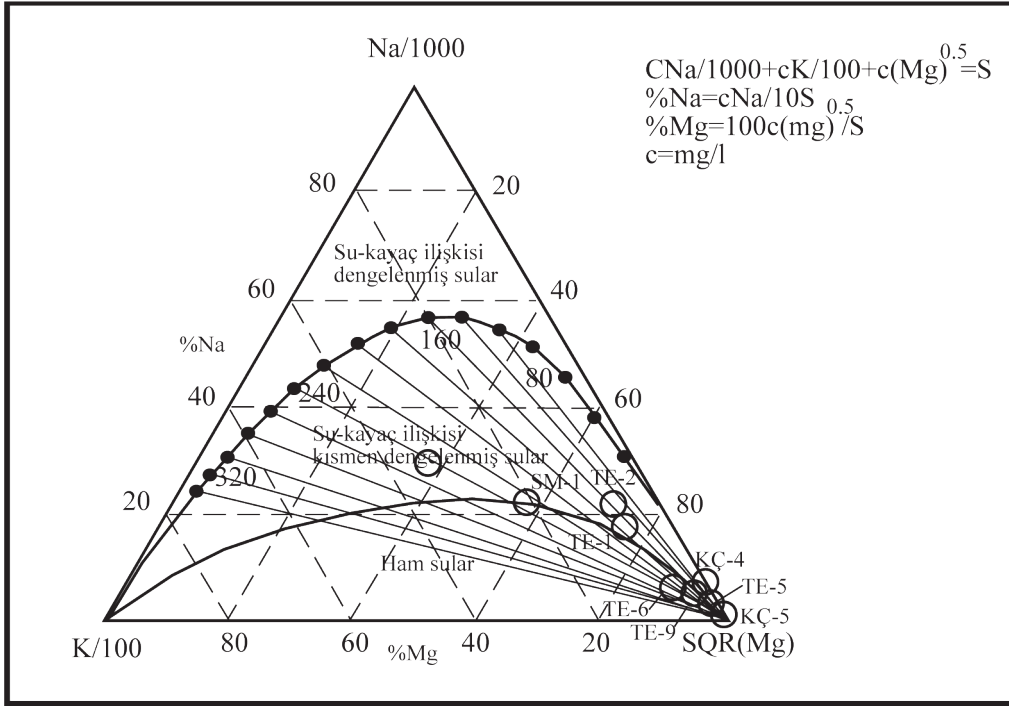
Mikroskobik ve petrografik inceleme sonuçlarına göre, örneklerin tümünde gözlenen hidrotermal alterasyon; kayaç hamurlarında genellikle devitrifiye , yer yer de karbonatlaşma ve killeşmeler şeklinde, çatlaklarda silisleşme, karbonatlaşma ve kloritleşme şeklinde, plajiyoklas kristallerinde silisleşme ve kaolinleşme şeklinde, olivin fenokristallerinin boşluklarında ise karbonatlaşma ve sferolitik dokulu silis yerleşimleri şeklinde gelişmiştir.

Kaya analizlerinden tespit edilen hidrotermal alterasyon minerallerine göre, Aliağa jeotermal sisteminde ileri arjilik, arjilik ve dış-pirofillitik olmak üzere üç ayrı alterasyon türü tanımlanmıştır. Bu alterasyon türlerinde gözlenen karakteristik minerallerin ortaya çıkış ve kayboluş sıcaklıkları eski sistemde akışkan sıcaklığının 175°C'ye kadar ulaşmış olduğunu göstermektedir.

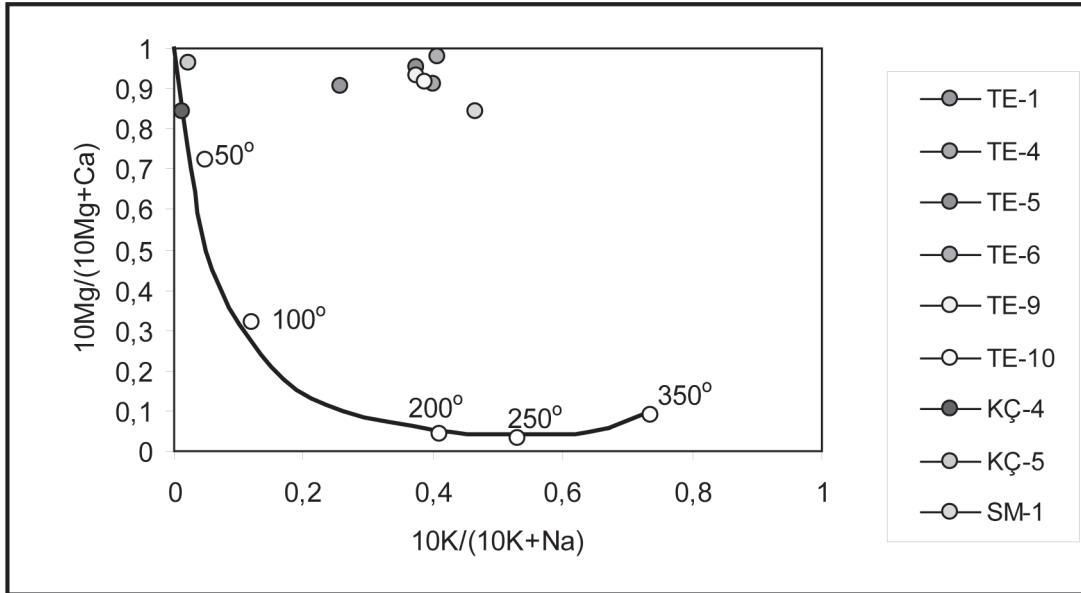
İnceleme alanında bulunan suların çoğunluğu Na-HCO<sub>3</sub>'lü, bir kısmı da NaCl' lü olup pH değerleri, 6.1'den 7.9'e kadar değişir ve genellikle nötr veya nõtüre yakındır. Ilıcaburun kaynağı denize yakın lokasyonu nedeni ile gelişen deniz suyu karışımından kaynaklı olarak diğer sulardan farklılık göstermektedir.

Tepkime sonucu oluşabilecek yeni alterasyon ürünlerini tahmin etmek için 25°C ve 1 atm basınç koşullarında hazırlanan Na-K-Ca-Mg sistemleri ve silis arasındaki mineral-akışkan duraylılık ilişkilerinin incelendiği aktivite diyagramları hazırlanmıştır. Bölgedeki sıcak sulara ait değerler de bu diyagramlar üzerine yerleştirilmiş ve 25°C, 1 atm koşullarında Na-Mg-Ca montmorillonit, kaolinit, K-feldispat ve Mg-klorit gibi alterasyon minerallerinin oluşabileceği saptanmıştır. 100°C ve 1 atm koşullarına göre hazırlanan diyagramlarda ise, suların K-feldispat, muskovit ve jipsit alanına düştükleri gözlenmiştir.

Sıcak suların kullanımı sırasında ortaya çıkacak sorunları önceden tespit etmek için mineral



Şekil 8. İnceleme alanındaki sıcak suların Na-K-Mg diyagramındaki görünüşleri (Giggenbach, 1988).  
Figure 8. Na-K-Mg Diagram of thermal waters found in the study area (Giggenbach, 1988).



Şekil 9. İnceleme alanındaki sıcak suların Giggenbach (1988)'in kare diyagramındaki izdüşümleri.  
Figure 9. Projections on square diagram of Giggenbach (1988) of thermal waters found in the study area.

Çizelge 6. İnceleme alanındaki suların olgunluk indisi değerleri.

Table 6. Saturation index value of water samples taken from study area.

Örnek No	SM-1	TE-1	TE-4	TE-5	TE-6	TE-9	TE-10	KÇ-4	KÇ-5	Deniz suyu
MI	2,02	2,03	1,57	1,39	1,59	1,56	1,57	2,27	1,61	2,1

doymunluk indekslerinin hesaplanmış ve inceleme alanındaki kayalarda tespit edilen alterasyon minerallerinin, sularında 100 ile 125°C arasında çökelmeye başlayacağı gözlenmiştir.

Sıcak suların katyon jeotermometrelerine göre hazne sıcaklıklarının belirlenmesi ve akışkan kayaç etkileşiminde denge ilişkilerinin incelenmesi için Giggenbach'ın (1988) Na-K-Mg üçgen ve Na-K-Ca-Mg kare diyagramları kullanılmıştır. Üçgen diyagramda inceleme alanındaki sıcak su bileşimlerinin çoğunun akışkan-kayaç dengesi tamamlanmamış alana düşmesi, kare diyagramda ise hazne kaya sıcaklığını veren eğriden çok uzakta bulunmalarından dolayı katyon jeotermometrelerinin kullanımının güvenilir olmadığı anlaşılmıştır. Diğer yandan, doymunluk indisi-sıcaklık ilişkileri ve akışkan-mineral denge durumları dikkate alındığında, aktif jeotermal sistemin hazne sıcaklığının yaklaşık 100-130 °C civarında olduğu söylenebilir.

#### KAYNAKLAR

Akay E., 2000. Magmatic and Tectonic Evolution of The Yuntdağ Volcanic Complex (Western Anatolia). Dokuz Eylül University Earth Science Institutes Doctorate Thesis,

Akay, E. ve Erdoğan, B., 2004. Evolution of calc-alkaline to alkaline volcanism in the Aliağa-Foça region (Western Anatolia, Turkey). Journal of Asian Earth Sciences, 24, 367-387.

Alptekin, Ö. 1978. Batı Anadolu depremlerinin odak mekanizmaları ve bunların aktif tektonik ile ilişkileri. 2. Odak mekanizmaları ve plaka tektoniği modeli, Jeofizik, c.7, sayı:3, S:35-57.

Browne, P. R. L., 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields, Ann. Rev. Earth Planet Sci. 6: 229-250.

Browne, P.R.L., Graham, I.J., Parker, R.J. and Wood, C.P., 1992. Subsurface andesite lavas and plutonic rocks in the Rotokawa and Ngatamariki geothermal systems, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. J. Volc. Geoth. Res. 51: 199-215.

Corbet, G. J., and Leach, T. M., 1997. Southwest Pacific rim Gold-Copper Systems: Structure, alteration and mineralization. Short Course Notes. 318 s.

Cox, K.G., Bell J.D. ve Pankhurst R.J., 1979. The interpretation of igneous rocks: George Allen and Unwin Ltd., Londra, 450p.

Dewey, J.F. and Şengör A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. Geol.Soc.Ame.Bull., PtI, 90, 84-92.

Dönmez, M., Türkecan A., Akçay A.E., Hakyemez Y., Sevin D., 1998. İzmir ve kuzeyinin jeolojisi Tersiyer volkanizmasının petrografik ve kimyasal özellikleri. MTA Rapor No: Je-149 (yayınlanmamış).

Eşder, T., Çiçekli K., Sarıkaya H., Yakabağı A., 1991. Aliağa (İzmir) yöresinin jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. MTA Rapor No: Jt-94.

Fournier, R.O. and Truesdell, A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometers for natural waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37, 1255-1275.

Giggenbach, W.F., Gonfiantini R., Jangi B.L. & Truesdel A.H., 1983. Isotopic and Chemical Composition of Parbati Valley Geothermal Discharges, NW Himalaya, Indiana. Geothermics. V.5, pp.51-62.

Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. Geochim. et Cosmochim. Acta. V.52, pp.2749-2765.

- Helgeson, H.C., 1969. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressure. *American Journal of Science* 267, 729-804.
- Helgeson, H.C, Kirkham D.H., 1974a. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. II Summary of the thermodynamic/electrostatic properties of the solvent. *Am. J. Sci.* V.274, pp.1189-1198.
- Helgeson, H.C, Kirkham D.H., 1974b. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. II Debye-Hückel parameters for activity coefficients and relative partial molar properties. *Am. J. Sci.*\_V.274, pp.1199-1261.
- Helgeson, H.C, Delany J.M., Nesbitt H.W., Bird D.K., 1978. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock forming minerals. *Am. J. Sci.* 278A, pp.1-229.
- Helgeson, H.C., Kirkham D.H., Flowers G., 1981. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. IV Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients and apparent partial molal and standard relative partial molar properties to 600°C and 5 kb. *Am. J. Sci.* V.281, pp.1249-1516.
- Helvacı, C., Ersoy, Y., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B., 2009. Geochemistry and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 185, 181-202.
- Irvine, T. N. and Baragar W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- Kaya, O., 1978. Ege kıyı kuşağı (Dikili-Zeytindağ-Menemen-YeniFoça) Neojen stratigrafisi. Ege üniversitesi Fen Fakültesi Monografiler serisi No:17.
- Kaya, O., 1979. Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, şubat.1979, cilt:22, s:1, s:35, Ankara.
- Kaya, O., 1983. Tersiyer sırt yitmesi: Doğu Ege bölgelerinin yapısı ve magmatikliği için olası bir mekanizma. *Türkiye Jeoloji Kurumu, Batı Anadolu'nun genç tektoniği ve volkanizması paneli.* 39-58.
- Kistler, R.W., Evernden, J.F., ve Shaw, R.H., 1971. Sierra Nevada Plutonics cycle: Part I., Origin of composite granitic batholits: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82, 853-868.
- Marini, L., Cioni R.& Guidi M., 1997. Water chemistry of San Marcos Area, Guatemala. *Royal Astronomical Society* 30, 109,185.
- Leach, D.L., 1994, Genesis of the Ozark Mississippi Valley-type metallogenic province, *in* Fontebote, L. and Boni, M., eds., *Sediment Hosted Zn-Pb Ores*, Springer-Verlag, p.104-138.
- Mc Kenzie, D.P., 1972, Active tectonics of the Alpin - Himalayan Belt : The Aegean sea and surrounding regions : *Geophys. Jour. Roy. Astr. Sock.* , 5, 217-254.
- Mutlu, H., 1998. Chemical geothermometry and fluid-mineral equilibria for the Ömer-Gecek thermal waters, Afyon area, Turkey; *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.80, no:3-4, pp.303-321.
- Müller, S., Kahle H.G. ve Barka A., 1997. Plate tectonic situation in the Anatolian-Aegean region. In: Schindler C., Pfister M. (Eds.), *Active tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Polyproject*, VDF, Hoschsulverlag AG an der ETH, Zürich, 13-28.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids; Chemistry and Exploration Techniques.* Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- Özkan, R., 2004., Aliğa (Güzelhisar) jeotermal sahasının jeolojisi ve hidrotermal alterasyonları. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir (Yayımlanmamış).

- Perkins, E. H., , Kharaka, Y. K., Gunter, W. D., and , DeBaal, J. D., 1990. Geochemical modeling of water–rock Interactions using SOLMINEQ.88 chapter (book). Chemical Modeling of Aqueous Systems II eds. Melchior, D. C., Bassett, R. L. American Chemical Society
- Şener, M., Gevrek A. İ., 2000. Distribution and significance of hydrothermal alteration minerals in the Tuzla hydrothermal system, Çanakkale, Turkey. Elsevier Journal of Volkanology and Geothermal Research V:96 (2000) pp:215/228.
- Şengör, A.M.C., 1979. On some 50% extension in the Aegean area and its implications for orogenic reconstructions in the Taurides, Rapp. Comm. Int. Mer. Mediterranean, 25/26, 2a, 41-42p.
- Şengör, A. M. C., 1980. Türkiye'nin neotektoniğinin esasları (Fundamentals of the neotectonics of Turkey). Publication of Geological Society of Turkey, 40p.
- Şengüler, İ., Şener M., Kök M.V., 2000. Paleotemperature analysis of Aliğa (İzmir, Turkey) Geothermal Field. Energy Sources, v.22, pp.357-362.
- Tokay, M., 1973. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Gerde ile Ilgaz arasındaki kısmında jeolojik gözlemler. Kuzey Anadolu Fayı ve Deprem Kuşığı Sempozyumu, MTA yayını, s:12-29.
- Wedepohl, K. H., Correns C.W., Shaw D.M., Türkian K. K., Zeman J., 1974. Handbook of Geochemistry: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Yıldırım, N., 1991. Aliğa jeotermal alanında su kimyası uygulamaları, MTA Raporu, Rapor no:Jeo-85.